

以太网工作原理

作者: *M. Simmons*
Microchip Technology Inc.

简介

本文档详细说明了在集成以太网的PIC® MCU以及独立以太网控制器中采用的以太网技术的工作原理。

表1列出了以太网技术的相关缩写/术语及定义。

应用

以太网是一种异步载波侦听多路访问/冲突检测 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect, CSMA/CD) 协议/接口, 有效负载大小为46-1500个八位字节, 数据速率高达几十到几百兆位/秒, 通常不太适合低功耗应用。

但是, 凭借大范围部署、互联网连接、高数据速率和无限的扩展性, 以太网几乎可以满足所有有线通信的需求。可能的应用包括:

- 远程检测和监视
- 远程命令、控制和固件更新
- 批量数据传输
- 实时流音频、视频和媒体
- 公共数据采集 (日期 / 时间、股票报价和新闻发布等)

工作原理

以太网是由IEEE 802.3™规范定义的数据链路层和物理层协议, 按照最大比特率、传输模式和物理传输介质分为多种类型。

- 最大比特率 (Mbps): 10、100 和 1000 等。
- 传输模式: 宽带和基带
- 物理传输介质: 同轴电缆、光纤和UTP等

表1: 以太网术语表

术语	定义
CRC	循环冗余校验: 一种校验和算法, 用于计算所有以太网帧的FCS以及对接收数据包进行哈希表过滤的哈希表密钥。
DA	目标地址: 以太网帧的目标地址字段, 共6个八位字节。
ESD	流结束分隔符: 在100 Mbps模式中, 通过在FCS之后 (帧间隔期间) 传输ESD来表示帧结束。
FCS	帧校验序列: 以太网帧末尾的4个八位字节字段, 其中包含该帧的错误检测校验和。
IP	Internet协议: 指IPv4或IPv6。
LAN	局域网或大型区域网络。
MAC	介质访问控制: 负责实现以太网规范的介质访问控制功能的模块。
MAC地址	6个八位字节的标识, 代表以太网节点的物理地址。每个以太网帧都包含源地址和目标地址, 两者都是MAC地址。
MDI	介质相关接口或管理数据输入。
MDO	管理数据输出。
MDIO	管理数据输入/输出。
MII	介质无关接口: MAC和PHY之间的标准4位接口, 用于传输TX和RX帧数据。在10 Mbps模式下, MII以2.5 MHz运行; 在100 Mbps模式下, MII以25 MHz运行。
MIIM	MII管理: 用于访问PHY寄存器的MII边带信号集。

表1: 以太网术语表 (续)

术语	定义
OUI	组织唯一标识符: MAC地址的前三个八位字节称为OUI, 通常分配给组织或公司。Microchip的OUI为00-04-A3h。
八位字节	在以太网术语中, 表示一个8位字节。
数据包缓冲区	存储所有发送和接收数据包(帧)的物理或虚拟存储器。
PHY	实现以太网物理层的模块。
RAM	随机访问存储器(通常为易失性存储器)。
接收缓冲区	数据包缓冲区的逻辑部分, 用于存储接收到的数据包。
RX	接收。
SA	源地址: 以太网帧的源地址字段, 共6个八位字节。
SFD	帧起始分隔符: 以太网帧中用于标记帧起始的单个八位字节字段。
SPI	串行外设接口。
SSD	流起始分隔符: 在100 Mbps以太网中, 前导码的第一个八位字节称为SSD, 其编码方式与前导码的其余部分不同。
站地址	站地址是以太网节点的MAC地址。通常将该地址与接收到的以太网帧中的目标地址进行比较, 以确定是否应接收该帧。在发送端, 通常将该地址作为以太网帧的源地址发送。
发送缓冲区	数据包缓冲区的逻辑部分, 用于存储要发送的数据包。
TX	发送。
RMII	精简的介质无关接口: MII的2位版本。
SMII	串行介质无关接口: MII的1位版本。
NRZI	不归零反相: 二进制代码, 信号跳变表示逻辑1, 无跳变表示逻辑0。

协议栈

要了解以太网的作用，最简单的方法是查看协议栈，其中以分层方法描述了一个完整的协议或一组协议（见图1）。

帧/数据包封装

要了解以太网的工作方式，首先需要了解数据包封装的概念，以及协议栈如何适应这一概念。

协议栈的每一层负责一种特定级别的功能。例如，物理层参与位在介质中的实际电传输。模型中的每个上层都以某种独立的方式使用下层（这意味着各层的功能之间极少甚至没有重叠）。

这种分层方法是通过封装来实现的。图2所示的示例可以完美地诠释这一概念。该示例显示了与Web浏览器会话关联的每一层如何映射到协议栈模型。

从应用层开始，Web浏览器将使用应用特定的命令生成HTTP请求。该请求随后将向下传递到TCP层，这将构造一个由TCP报头和TCP数据组成的TCP数据包。TCP报头包含TCP协议的特定信息，例如数据包排序信息、校验和信息以及源端口号和目标端口号（HTTP的端口号通常为80）。

在IP协议级别，将构建一个IP数据报来保存TCP数据包。与TCP数据包类似，IP数据报由IP报头和IP数据组成。IP报头包含诸如服务类型、校验和信息、协议类型（对于TCP为06h）以及源IP地址和目标IP地址等信息。IP数据报的数据字段包含要发送的完整TCP数据包。

在数据链路/物理层，IP数据报使用IEEE 802.3协议在网络中传输。MAC（IEEE 802.3）帧由MAC报头和MAC有效负载（数据）组成。MAC报头包含MAC帧的相关信息，例如源MAC地址、目标MAC地址和帧长度。有效负载字段包含要传输的完整IP数据报。

请注意，封装在每个协议中的地址是不同的，彼此之间通常没有固定的关系。在我们的示例中，TCP数据包使用端口号，该端口号通常基于应用层协议进行分配（例如，HTTP对应端口80）。IP数据报使用IP地址，该地址是从可用Internet地址池中以静态或动态的方式分配。MAC帧使用MAC地址，该地址分配给特定的硬件部分。

注 1: 在本文档中，“MAC帧”、“以太网帧”和“IEEE 802.3帧”这三个术语可互换使用。

2: “数据包”、“帧”和“数据报”这三个术语经常互换使用，它们分别应用于特定的协议，例如IEEE 802.3帧、TCP数据包或IP数据报。

图1: Internet协议栈

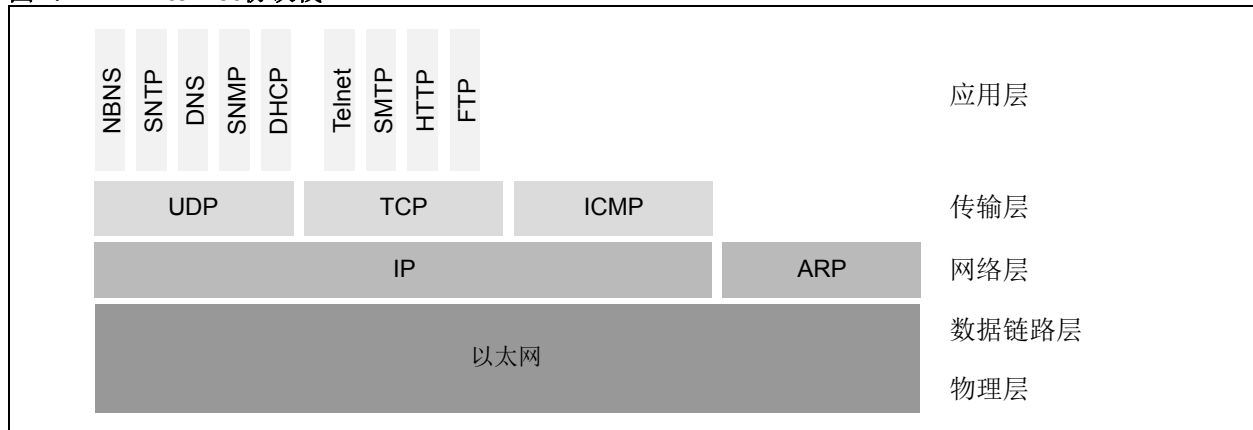


图2: 数据封装示例



应用层协议

应用层提供用户接口。

在某些较低层协议（UDP 或 TCP，参见**传输层协议**部分）之上使用应用层协议时，通常会为后者分配一个端口号。例如，HTTP 服务器通常与端口 80 相关联。

以下是与 Internet 相关联的常见应用层协议：

超文本传输协议（Hyper Text Transfer Protocol, HTTP）：主要用于传输与万维网浏览相关的数据。

简单邮件传输协议（Simple Mail Transfer Protocol, SMTP）：用于在 Internet 上传输电子邮件。

文件传输协议（File Transfer Protocol, FTP）：用于在 Internet 上传输文件或其他数据部分。

域名系统（Domain Name System, DNS）：用于将域名（如“microchip.com”）转换为 IP 地址。

动态主机配置协议（Dynamic Host Configuration Protocol, DHCP）：用于将可用 IP 地址池中的 IP 地址动态分配给特定节点。

Telnet：用于与节点建立交互式 TCP 连接。

简单网络时间协议（Simple Network Time Protocol, SNTP）：用于允许节点将其时钟与参考时钟同步。

简单网络管理协议（Simple Network Management Protocol, SNMP）：用于监视联网设备是否存在需要干预的情况，如故障等。

传输层协议

传输层负责隐藏上面几层中与网络相关的详细信息，包括传输地址到网络地址的转换、排序和错误检测/恢复等。

在 IP 协议之上使用传输层协议时，通常会为后者分配一个 IP 协议编号。

以下是与 Internet 相关联的常见传输层协议：

传输控制协议（Transmission Control Protocol, TCP）：为应用提供可靠的通信。

用户数据报协议（User Datagram Protocol, UDP）：为应用提供高性能但不可靠的通信。

Internet 控制报文协议（Internet Control Message Protocol, ICMP）：用于发送网络和/或节点错误或状态报文。

网络层协议

网络层决定报文在网络中的路由方式，包括服务质量（Quality of Service, QoS）服务以及传输层网络地址配置等。

在以太网之上使用网络层协议时，通常会为后者分配一个“EtherType”，更多信息将在**以太网帧格式**部分详细讨论。

以下是与Internet相关联的常见网络层协议：

地址解析协议（Address Resolution Protocol, ARP）：用于将协议地址转换为硬件接口地址，例如将IP地址转换为MAC地址。

反向地址解析协议（Reverse Address Resolution Protocol, RARP）：用于将硬件接口地址转换为协议地址，例如将MAC地址转换为IP地址。

Internet协议（Internet Protocol, IP）：TCP和UDP等使用的无连接网络层协议。

物理/数据链路层协议

物理层在物理连接上以透明方式发送比特流，包括编码、多路复用、同步、时钟恢复和序列化等。

数据链路层以无错方式传输帧（块），包括帧排序和帧流控制等。

以太网是最常见的物理/数据链路层协议之一，也是本应用笔记剩余部分的主题。

物理介质概述

如前文所述，以太网可按传输帧的物理介质来定义。下面汇总了一些比较常见的介质：

- 1 Mbps
 - 1Base5: 2条双绞电话线
- 10 Mbps
 - 10Broad36: 1条宽带线缆
 - 10Base2: RG 58同轴线缆
 - 10Base5: 1条同轴线缆
 - 10Base-F: 1条光纤
 - 10Base-T: 2对UTP CAT3或更高规格，全双工
- 100 Mbps
 - 100Base-FX: 2条光纤，全双工
 - 100Base-T2: 2对UTP CAT3或更高规格，全双工
 - 100Base-T4: 4对UTP CAT3或更高规格，全双工
 - 100Base-TX: 2对UTP CAT5或更高规格，全双工
- 1 Gbps
 - 1000Base-CX: 铜跳线
 - 1000Base-LX: 长波长多模/单模光纤
 - 1000Base-SX: 短波长多模光纤
 - 1000Base-T: 4对CAT5e、CAT6或更高规格

注 1: UTP——非屏蔽双绞线

2: CAT3线和铜电话线本质上是可互换的。

以太网规范

以太网规范（IEEE 802.3）在最近几年一直在不断发展，现已纳入更高的传输速率以及新的功能。表4列出了最常用的规范补充资料。

以太网帧格式

基本的10/100以太网帧由以下字段组成，如图3所示。

前导码：7个八位字节（均为55h）。在100 Mbps操作中，第一个八位字节经4B/5B编码为/J/K/（稍后将详细说明具体含义），称为流起始分隔符（Start-of-Stream Delimiter, SSD）。前导码的作用是允许接收器在实际帧到达之前锁定数据流。

帧起始分隔符（Start-of-Frame Delimiter, SFD）：10101011b（如物理介质上所示）。SFD有时被视为前导码的一部分。这就是为什么前导码有时被描述为8个八位字节的原因。

目标地址（Destination Address, DA）：目标硬件的MAC地址，共6个八位字节。有关多播和广播寻址的信息，请参见**MAC地址**部分。

源地址（Source Address, SA）：源硬件的MAC地址，共6个八位字节。

长度/类型：该字段为2个八位字节，如果值 ≤ 1500 （十进制），则表示有效负载中的八位字节数。如果值 ≥ 1536 ，则表示EtherType（有效负载类型）。以下是最常用的EtherType值：

- IPv4 = 0800h
- IPv6 = 86DDh
- ARP = 0806h
- RARP = 8035h

有效负载（客户端数据）：IP数据报等客户端数据。最小有效负载为46个八位字节；最大有效负载为1500个八位字节。尽管低于或高于这些限值的有效负载不符合IEEE 802.3规范，但不同的供应商可为这些有效负载提供不同的支持。有关该主题的进一步讨论，请参见**帧大小**部分。

填充：由于最小有效负载大小为46个八位字节，因此不足46个八位字节的有效负载必须通过插入填充八位字节来达到该最小值。

帧校验序列（Frame Check Sequence, FCS）：使用32位循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）基于源地址、目标地址、长度/类型、数据和填充字段来计算4个八位字节的FCS字段的值。

流结束分隔符（End-of-Stream Delimiter, ESD）：在100 Mbps模式中，通过PHY在FCS之后发送/T/R/符号对（在帧间隔期间）来表示帧结束。

在10 Mbps模式中，通过特殊的TP_IDL信号（本文稍后讨论）和网络静默来表示帧结束。与100Base-T中的/T/R/符号对相同，该特殊TP_IDL标记不被视为帧数据的一部分。

注： MAC帧按“八位字节”（一个八位字节 = 8个位）枚举。

图3： 基本帧格式

10/100 IEEE 802.3™ 帧	
7个八位字节	前导码
1个八位字节	帧起始分隔符（SFD）
6个八位字节	目标地址（DA）
6个八位字节	源地址（SA）
2个八位字节	长度（ ≤ 1500 ） 类型（ ≥ 1536 ）
46个八位字节 至 1500个八位字节	客户端数据（有效负载）
4个八位字节	填充（如有必要）
	帧校验序列（FCS）

除了上述基本帧之外，10/100以太网中还有两种其他常见的帧类型：控制帧和VLAN标记帧。图4对三种常见的10/100帧格式和千兆位以太网帧格式进行了比较。

图4: 常见的以太网帧类型

	10/100 数据帧	10/100 控制帧	10/100 VLAN 帧	千兆位数据帧
7个八位字节	前导码	前导码	前导码	前导码
1个八位字节	帧起始分隔符 (SFD)	帧起始分隔符 (SFD)	帧起始分隔符 (SFD)	帧起始分隔符 (SFD)
6个八位字节	目标地址 (DA)	目标地址 (DA)	目标地址 (DA)	目标地址 (DA)
6个八位字节	源地址 (SA)	源地址 (SA)	源地址 (SA)	源地址 (SA)
2个八位字节	长度 (≤ 1500) 类型 (≥ 1536)	8808h	8100h	长度 (≤ 1500) 类型 (≥ 1536)
2个八位字节			标记控制信息	
2个八位字节			长度 (≤ 1500) 类型 (≥ 1536)	
46个八位字节 至 1500个八位字节	客户端数据 (有效负载)	控制操作码 (2个八位字节) 控制参数 (2个八位字节)	客户端数据 (有效负载)	客户端数据 (有效负载)
4个八位字节	填充 (如有必要)	00h (42个八位字节)	填充 (如有必要)	填充 (如有必要)
0个八位字节 至 448个八位字节	帧校验序列 (FCS)	帧校验序列 (FCS)	帧校验序列 (FCS)	帧校验序列 (FCS)
				载波扩展

帧大小

在讨论IEEE 802.3帧大小时，通常不包括前导码/SFD。因此，基本帧或控制帧的最小和最大允许大小分别为64个八位字节和1518个八位字节。相反，VLAN标记帧的最大大小（在VLAN标记帧部分介绍）定义为1522个八位字节。

低于64个八位字节限值的帧通常称为“超短帧”，而高于1518个八位字节限值的帧通常称为“超长帧”或“巨型帧”。术语“巨型帧”是指10/100Base-T中高于1518个八位字节的帧和千兆位以太网中高于9000个八位字节的帧。术语“小巨型帧”有时用于指长度超过6000个八位字节的帧。

在某些文献中，术语“帧大小”仅指帧的有效负载。因此，术语“巨型帧”普遍被定义为高于1500个八位字节的帧。

控制帧

EtherType 值为8808h的以太网帧被指定为MAC控制帧，并用于控制链路上的帧流。可选择在以太网节点中实现MAC控制功能。

MAC控制帧有效负载中的前两个八位字节包含操作码。目前，惟一的标准控制帧为暂停帧，它包含操作码和目标地址，如下所示：

- 操作码：0001h
- 地址：01-80-c2-00-00-01（多播）

暂停帧会请求链路另一端的站点停止传输一段时间（由操作码后的2个八位字节的暂停时间指定）。一个暂停“份额”等于512个位时间。

传输暂停时间值为0000h的暂停帧意味着取消任何现有的有效暂停。

VLAN 标记帧

虚拟局域网（Virtual Local Area Network, VLAN）标记用于将附加信息（称为标记控制信息）添加到帧中，以允许创建由逻辑拓扑（而不是物理拓扑）定义的网络。

MAC 地址

MAC地址是每个以太网硬件惟一的48位（6个八位字节）标识。它由一个24位的组织惟一标识符（Organizationally Unique Identifier, OUI）和一个24位的硬件标识符组成，如图5所示。

OUI由IEEE分配给特定的公司或组织（Microchip的OUI是00-04-A3h），而硬件ID则由该特定OUI的所有者分配。

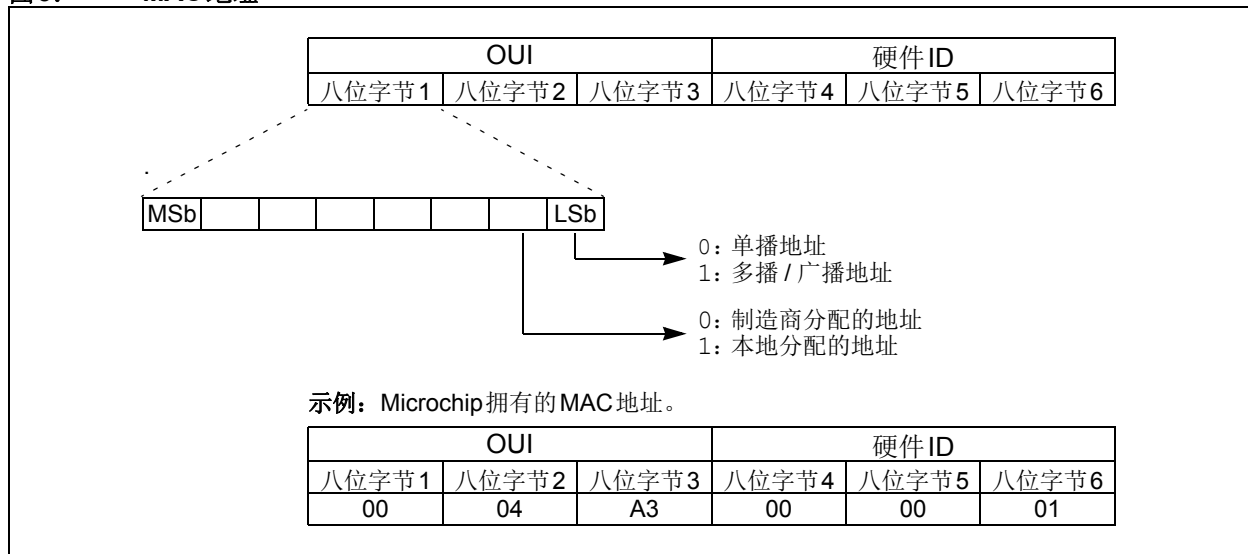
对于最多需要4096个MAC地址的个人，可以购买个人地址块（Individual Address Block, IAB）。IAB由保留的OUI（归IEEE所有）加上12位的保留硬件标识符组成，其中的12位硬件标识符可供购买者使用，共有4096个惟一MAC地址。

MAC地址八位字节先发送高字节（第一个八位字节开始），每个字节先发送最低有效位（Least Significant bit, LSB）。

当MAC地址的第一个八位字节中的最低有效位被设为多播地址时，可以用于一个或多个节点。例如，地址为01-80-c2-00-00-01的暂停帧被视为多播数据包。

MAC地址FF-FF-FF-FF-FF-FF是广播地址，用于所有节点。

图5: MAC地址



流构建/解构

现在，我们将基于前文所述的协议层模型和帧封装内容来讨论以太网MAC和PHY的功能。图6给出了100 Mbps时PHY和MAC层的IEEE 802.3定义。从该图中可得出一条重要信息，即以太网PHY和MAC的功能以及各自的接口均由IEEE 802.3规范定义。

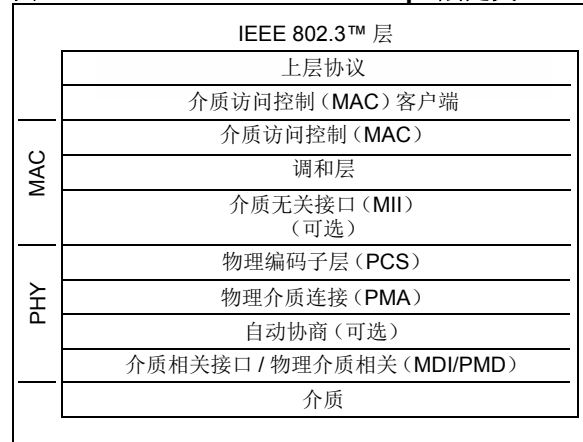
传输介质的物理接口称为MDI，它会根据使用的介质（双绞线和光纤等）而变化。

PHY和MAC之间的接口称为MII，由接收路径、发送路径和管理路径组成，用于读取和写入PHY寄存器。接收路径和发送路径的宽度相同，由MAC和PHY的实现速度决定，如下所示：

- 10 Mbps: 2.5 MHz时的宽度为4位
- 100 Mbps: 25 MHz时的宽度为4位

注： 此外，还定义了精简MII（Reduced MII, RMII）和串行MII（Serial MII, SMII）接口，宽度分别为2位和1位。

图6: IEEE 802.3™ 100 Mbps层定义



调和层： 将物理状态（载波丢失和冲突等）映射到MAC层。

介质无关接口 (MII) (可选)： 为PHY提供n位发送/接收接口。

物理编码子层 (Physical Coding Sublayer, PCS)： 传出符号流的编码、多路复用和同步（4B/5B 编码等）。

物理介质连接 (Physical Medium Attachment, PMA)： 信号发送器/接收器（符号流的序列化/反序列化以及时钟恢复等）。

自动协商 (可选)： 通过协商选择两个主机均支持的最高模式。

介质相关接口/物理介质相关 (Medium Dependent Interface/Physical Media Dependent, MDI/PMD)： RJ45等。

介质： UTP 和光纤等。

图7: 流解构 (RX)

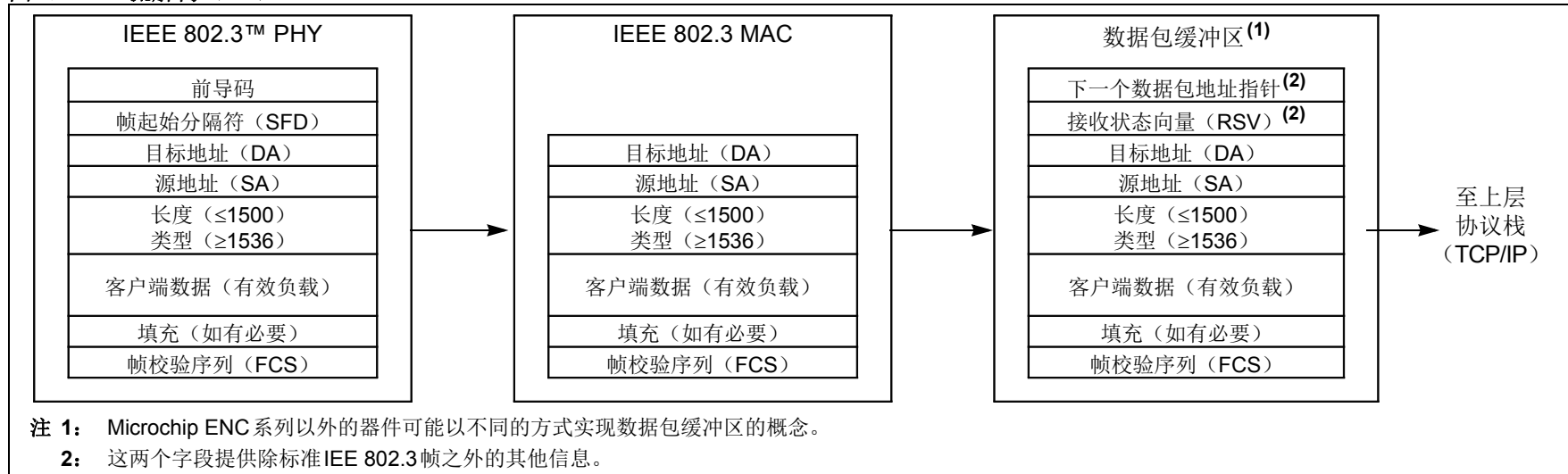
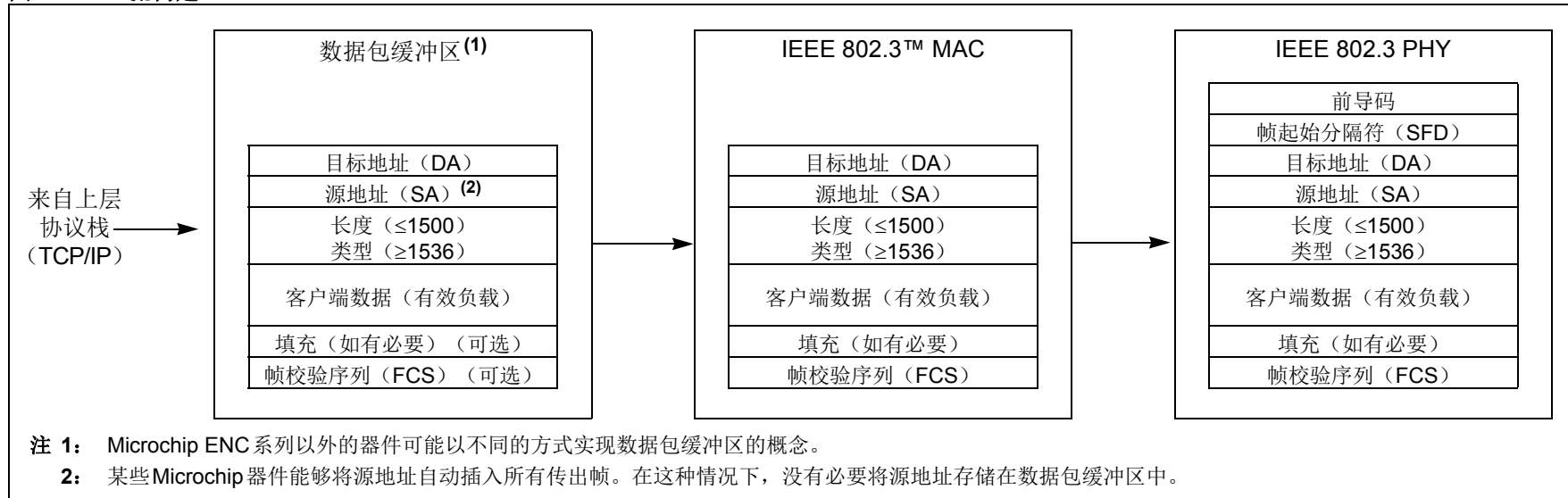


图8: 流构建 (TX)



流时序

到目前为止，我们已经讨论了如何组装数据和将其分解为数据包，以及MAC和PHY在此过程中的作用。剩下的就是构建的流在物理介质上的实际传输。

在我们了解IEEE 802.3帧的时序之前，我们必须了解时序背后的原因。

载波侦听多路访问/冲突检测 (CSMA/CD)

最初，以太网被设计为一种在共享介质上运行的协议，如图9所示。在这种拓扑中，总线上的所有节点都可以平等地访问总线，但是一次只有一个节点可以进行发送并且采用半双工的形式。如果多个节点同时传输，则会导致介质上的数据混乱，进而丢失数据。从这个简单的例子中，我们可以得出网络协议的一些基本要求：

- 必须支持多个节点在共享介质上发送数据（多重访问）。
- 每个节点必须能够检测另一个节点何时进行发送（载波侦听）。
- 在多个节点将介质视为空闲并同时开始发送的情况下，传输节点必须能够确定何时发生同时发送（冲突检测）。
- 当检测到冲突时，每个节点都必须通过某种方法确定何时重新发送，避免各节点再次同时尝试重新发送（后退）。

以太网中使用称为载波侦听多路访问/冲突检测（CSMA/CD）的方案来满足这些要求。

在以太网节点开始发送之前，它必须先确定介质是处于工作状态还是空闲状态（载波侦听）。如果介质处于工作状态，则该节点必须先等待介质变为空闲状态，并且再等待一段预先确定的时间，之后才能开始发送。这段预先确定的时间称为包间隔（Inter-Packet Gap, IPG），也称为帧间隔（Inter-Frame Gap, IFG），时长取决于总线的速度，如表2所示。IPG用作帧之间的恢复时间，以便让节点准备好接收下一个帧。

但是，如果有多个节点在等待介质变为空闲状态，则一旦介质变为空闲状态，这些节点几乎可以同时开始发送。因此，所有节点还必须能够检测这些冲突（冲突检测）。

如果尝试在空闲介质上进行发送的两个节点位于介质两端，并且其中一个节点在发现介质上另一节点发送之前便已开始发送，则会发生最坏的情况。例如，我们假设图9中的节点1和节点4要进行发送。节点1开始传输时，其数据需要经过一段时间才能通过介质向下传播到节点4。而节点4开始发送时尚未发现来自节点1的数据。在这种情况下，节点4将立即检测到介质上的冲突，并将一种称为干扰信号的特殊模式发送到介质上。该干扰信号必须立即返回到节点1，然后通过将其发送的数据与接收的数据进行比较来检测是否发生了冲突。这适用于10Base2、10Base5和10Base-F节点，这些节点共用一个公共介质。

图9： 共用总线拓扑（10Base2）

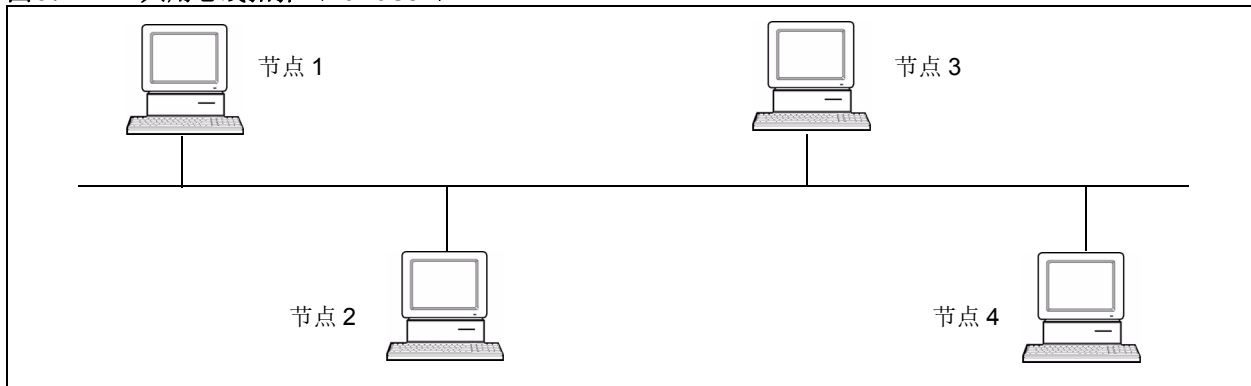


表2： 关键以太网时序参数

	位时间	IPG 时间	时隙	网络直径 (无中继器)	网络直径 (带中继器)
10BASE-T	100 ns	9.6 μ s	512 个位时间 = 51.2 μ s	100m	2500m
100BASE-TX	10 ns	960 ns	512 个位时间 = 5.12 μ s	100m	205m

这意味着大约需要两倍于网络信号传播的时间才能确保介质上的所有节点均能够检测到冲突。该时间称为冲突窗口或时隙。表2列出了各种速度下的时隙。

我们所描述的情况称为“窗口内”冲突，因为是在时隙内检测到的。但是，如果网络的大小大于网络直径，则可能发生“窗口外”或“迟”冲突。迟冲突不像窗口内冲突那样被视为发送错误，而是被视为网络拓扑本身的问题。与窗口内冲突不同，迟冲突不在以太网的物理/数据链路层处理，而是必须由应用软件检测和处理。

基于以上示例可以看出，冲突窗口等于帧的最小大小。但是，增加帧的大小会影响从冲突中恢复的时间。

为此，IEEE 802.3规范的原作者想出了折衷的办法，他提出了针对10Base-T和100Base-T以太网的“合理”冲突窗口（在表2中称为“网络直径”），然后设置最小帧大小以匹配所选网络直径。这样，运行速度为1000 Mbps的千兆位以太网的网络直径自然而然就是100Base-T的1/10。但是，实际上这将导致大约20m的网络直径无法使用。千兆位以太网通过在帧的末尾添加位来扩展帧大小（称为“载波扩展”），以形成4096位的有效最小帧长度。这样会使网络直径与100Base-T大致相同。

由于100Base-T的传输速率是10Base-T的10倍，因此传输一个帧所需的时间是10Base-T的1/10。反过来，这意味着时隙从10Base-T的约50 μ s缩短到100Base-T的约5 μ s。因此，网络直径从2500m缩小到约200m。

请注意，半双工可用于不使用共享总线拓扑的拓扑，例如点对点连接（图10）。在这种情况下，一个节点的TX线/RX线连接到另一节点的RX线/TX线。因此，每个节点都可以在发送时轻松地在其RX端口上查找数据，这样很容易检测到冲突。如果在发送期间接收到任何数据，则连接的节点一定也在发送并因此发生了冲突。这适用于10Base-T以及所有100 Mbps和千兆位以太网节点。

对网络协议的最后一项要求是提供一种方法让各个节点能够确定何时重新发送。如果各个节点同时尝试重新发送，则将无限期地继续发生冲突。

为此，以太网实现了所谓的二进制指数后退算法，其工作原理如下：

1. 每个节点在第一次尝试重新发送之前均选择一个随机延时（范围为0到1）。
2. 如果发生另一个冲突，则每个节点都会将随机延时的范围加倍（当前范围为0到3），然后再次选择一个随机延时。
3. 重复执行上述过程（范围为0到7、0到15等），直到不再发生冲突或已尝试10次为止。此时，每个节点的定义范围将为0到1023。这样，每尝试一次，后退时间范围都会呈指数增长，因此发生冲突的概率会迅速降低。
4. 继续尝试重新发送6次（共16次）。如果节点在重新发送时仍不成功，则将丢弃帧，并会报告过多冲突错误。随后，应用软件必须检测到帧丢弃，并根据需要尝试重新发送丢弃的帧。

全双工操作

早期的以太网网络是使用共享介质和所需的CSMA/CD来实现的，而现代的以太网网络大多采用点对点（图10）或星形拓扑（图11，可视为大量的点对点连接）配置。

在任一配置中，由于每个节点最多连接一个其他节点，因此每个节点都可以全双工模式工作。使用点对点/全双工配置时，不可能发生冲突，因此不使用CSMA/CD。每个节点都可随时进行发送，但每次发送仍受到包间隔的限制。

此外，介质的总吞吐量翻倍（即，从10 Mbps到20 Mbps或从100 Mbps到200 Mbps）。

全双工操作的优势还包括能够消除由于时隙引起的网络直径限制。

请注意，并非所有介质类型均支持全双工，特别是以下类型：

- 10Base2
- 10Base5
- 10Base-FP
- 10Base-FB
- 100Base-T4

图10： 点对点拓扑

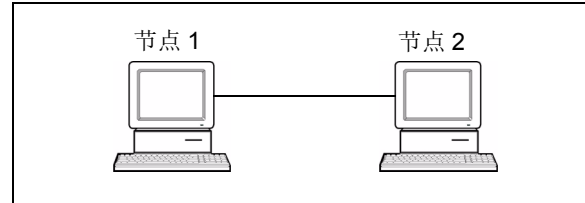
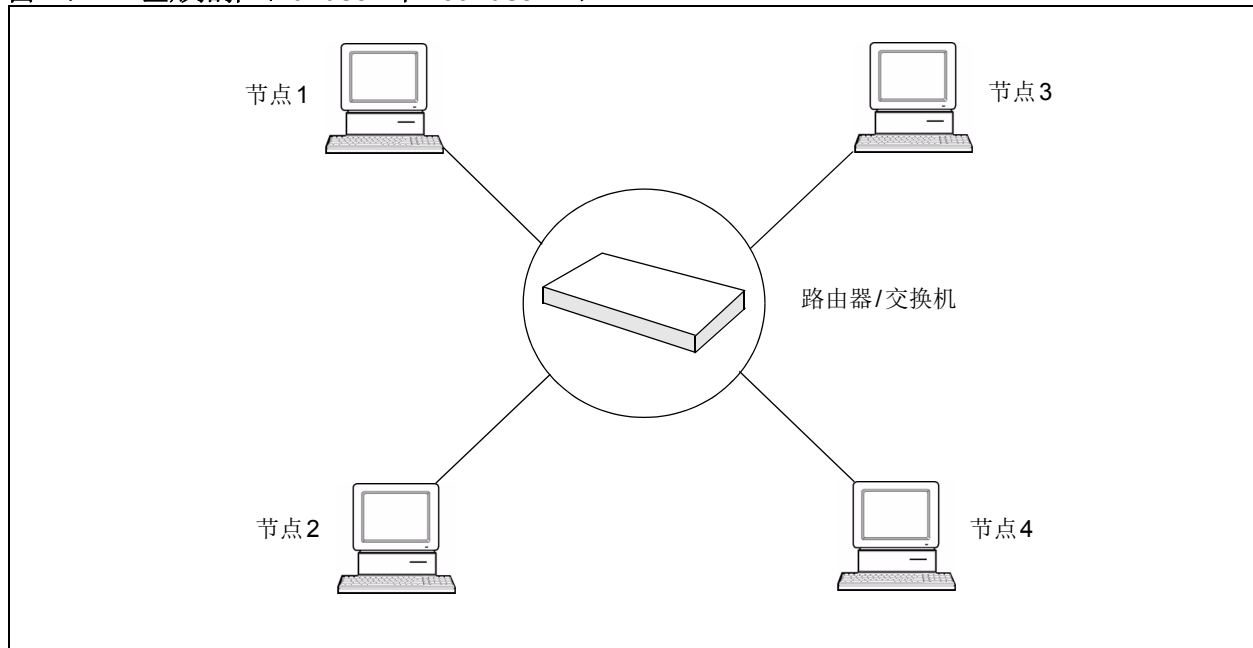


图11： 星形拓扑（10Base-T和100Base-TX）



10 Mbps 流内容

10 Mbps 流和 100 Mbps 流之间存在明显的区别，我们先讨论 10 Mbps 流的内容和信号传输。本节介绍图 3 中所示的帧实际上是如何通过物理介质（即 CAT5 线缆等）进行传输的。

传输 10 Mbps 流的第一步是使用曼彻斯特编码对要发送的数据进行编码。曼彻斯特编码将逻辑 0 编码为信号上低电平到高电平或高电平到低电平的位中跳变，将逻辑 1 编码为相反跳变。在以太网中，逻辑 0 编码为高电平到低电平的跳变，而逻辑 1 编码为低电平到高电平的跳变。有关示例，请参见图 12。

使用曼彻斯特编码是因为它具有很高的可靠性，并且能够从数据流中提取时钟。但是，它需要将待发送数据的带宽加倍。

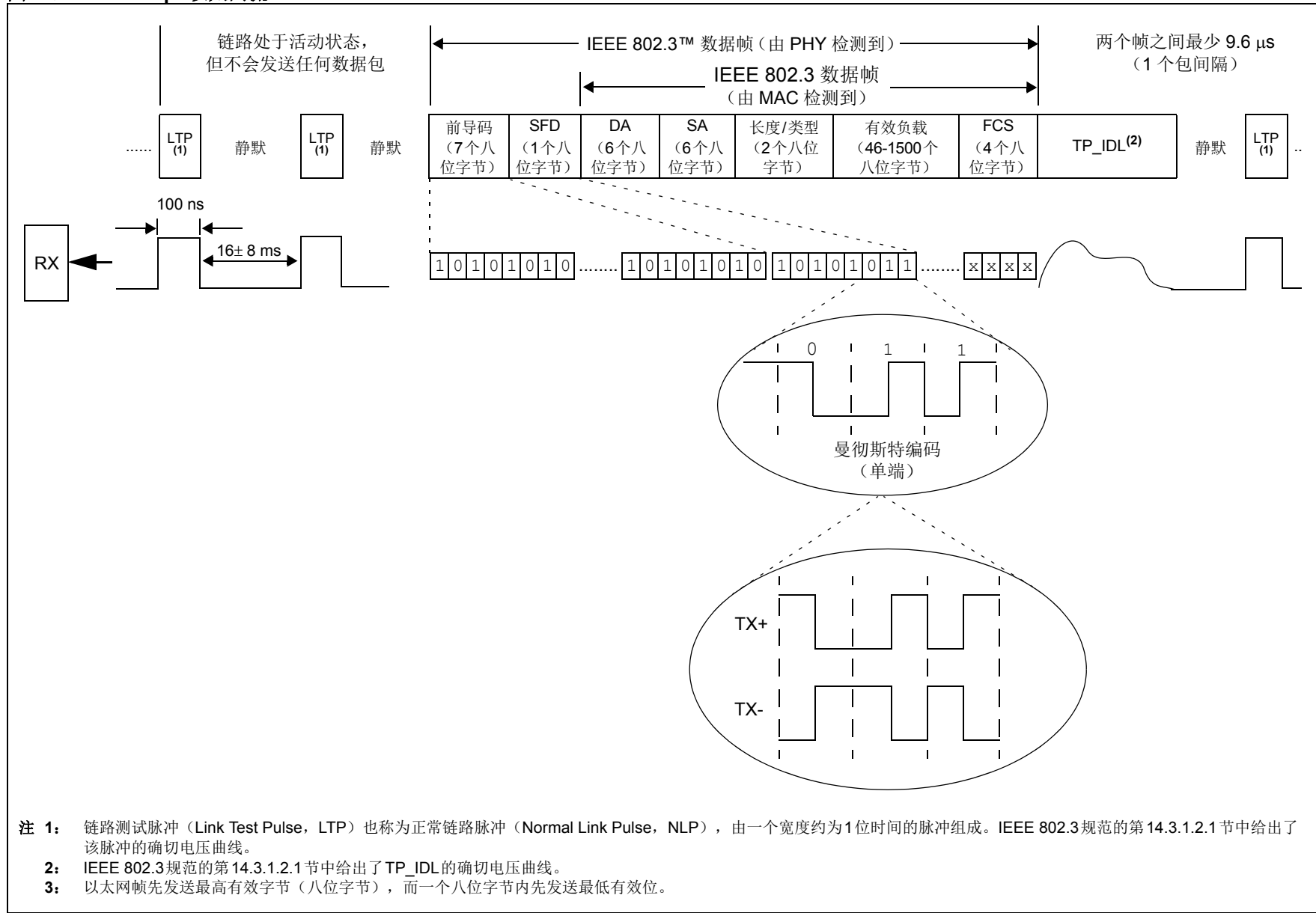
由于 10Base-T 以太网使用差分信号，因此曼彻斯特编码的信号使用差分信号传输，如图 12 所示。

传输的第二步是对输出信号进行波形整形，以满足 IEEE 802.3 规范中定义的信号曲线。这些曲线的作用是在特定物理介质上传播所需的长度来确保足够的信号传播，同时将不想要的 EMI 辐射降至最低。

最后，使用电压驱动或电流驱动（取决于特定的 IEEE 802.3 PHY）通过线缆从隔离变压器传输信号。

接收器的差分电压大小在 350 mV 和 3.1V 之间。

图 12: 10 Mbps 以太网流⁽³⁾



100 Mbps 流内容

由于非屏蔽双绞线（Unshielded Twisted Pair, UTP）本质上是低通的，因此当我们将速度提高 10 倍时（100 Mbps 模式所需的步骤），用于 10Base-T 的编码方案将不起作用。

此外，根据监管准则，通过某些类型的物理链路（即电话线等）传输的功率限制在大约 30 MHz 以下。因此，对于 100Base-T，需要不同的编码方案。

100Base-TX 中使用的编码方案称为多电平跳变 3（Multi-Level Transition 3, MLT3），如图 13 所示。每个逻辑 0 或 1 均编码为跳变到 3 种电平之一（对应 MLT3 中的“3”）。跳变时始终跳变为最接近的电平，并且始终采用相同的顺序（-1, 0, +1, 0, -1...）。逻辑 0 表示无跳变，而逻辑 1 表示跳变。

以图 13 所示的位序列 11111 为例。由于 1 始终表示跳变，因此恒为 1 的序列将对每个位进行跳变，如图所示。

由于始终跳变为最接近的电平，因此可始终将跳变时间缩短至最小值。

由于 MLT-3 需要通过 4 次跳变（-1 到 0 到 1 到 0 到 -1）来完成一个完整周期，因此最大基频降低了 4 倍，从 125 MHz 降至 31.25 MHz。这满足了不高于约 30 MHz 的功率传输要求。

由于 4B/5B 编码的原因，非编码信号频谱为 125 MHz，而不是预期的 100 MHz，4B/5B 编码将在下一部分讨论。

4B/5B 编码

除了 MLT3 的物理编码之外，100Base-TX 还引入了一种称为 4B/5B（有时称为“块编码”）的逻辑编码。100Base-TX 编码必须满足两个主要要求。

首先，它必须解决发送一长串 0 数据流时存在的时钟恢复问题。回顾一下，在 MLT3 中，0 表示所传输的信号中无跳变。在没有明确时钟的情况下，由于各种抖动的影响，发送和接收节点很快就会失去同步。这最终将导致数据损坏。

其次，除了必须允许传输数据之外，还必须允许传输信号代码，例如流起始、流结束、错误和空闲。

对于上述问题，100 Mbps 以太网所采用的解决方案是在传输介质上将每 4 位数据编码为 5 位。表 3 给出了从 4 位到 5 位的转换。这意味着 100 Mbps 以太网在物理介质上的实际传输速率为 125 Mbps。

如果仔细观察所有代码（错误代码/H/除外）的编码，我们会发现实际传输的值始终至少包含两个 1，这将导致传输的任何数据的 MLT3 波形中至少有两次跳变。这解决了时钟恢复的问题。

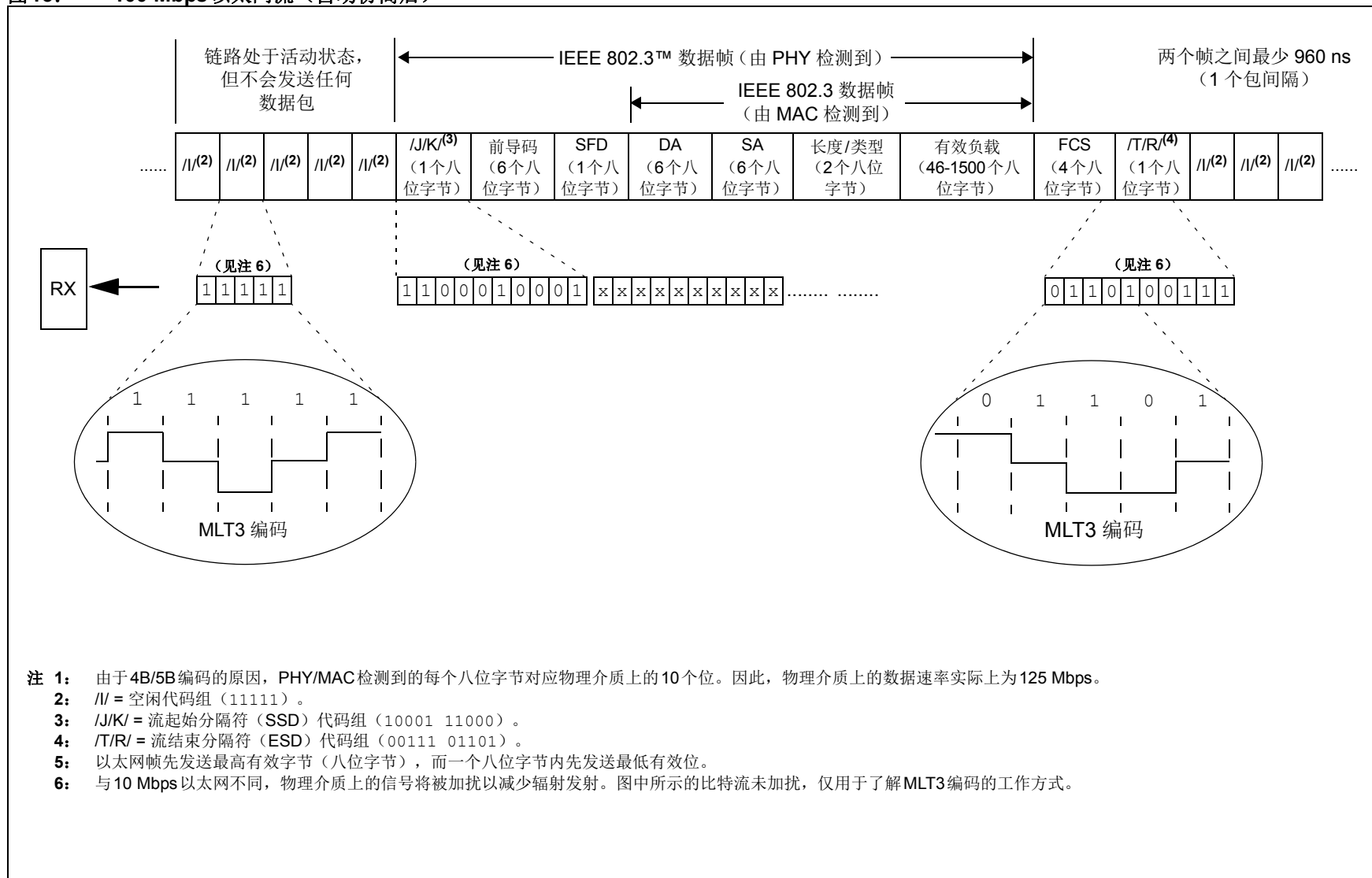
对于 16 个数据值的 2^5 个编码，现在有 16 个额外的值可用于传输信号数据。其中包括：

- 空闲，它取代了 10Base-T 中使用的正常链路脉冲（NLP）
- 流起始分隔符（SSD），它代替了 10Base-T 中的前导码的第一个八位字节
- 流结束分隔符（ESD），它代替了 10Base-T 中使用的 TP_IDL 波形
- 发送错误，在 10Base-T 中没有等效项

表 3: 4B/5B 编码

代码	值	定义
0	11110	数据 0
1	01001	数据 1
2	10100	数据 2
3	10101	数据 3
4	01010	数据 4
5	01011	数据 5
6	01110	数据 6
7	01111	数据 7
8	10010	数据 8
9	10011	数据 9
A	10110	数据 A
B	10111	数据 B
C	11010	数据 C
D	11011	数据 D
E	11100	数据 E
F	11101	数据 F
I	11111	空闲
J	11000	SSD（第 1 部分）
K	10001	SSD（第 2 部分）
T	01101	ESD（第 1 部分）
R	00111	ESD（第 2 部分）
H	00100	发送错误

图 13: 100 Mbps 以太网流 (自动协商后) (1,5)



编码/解码概述

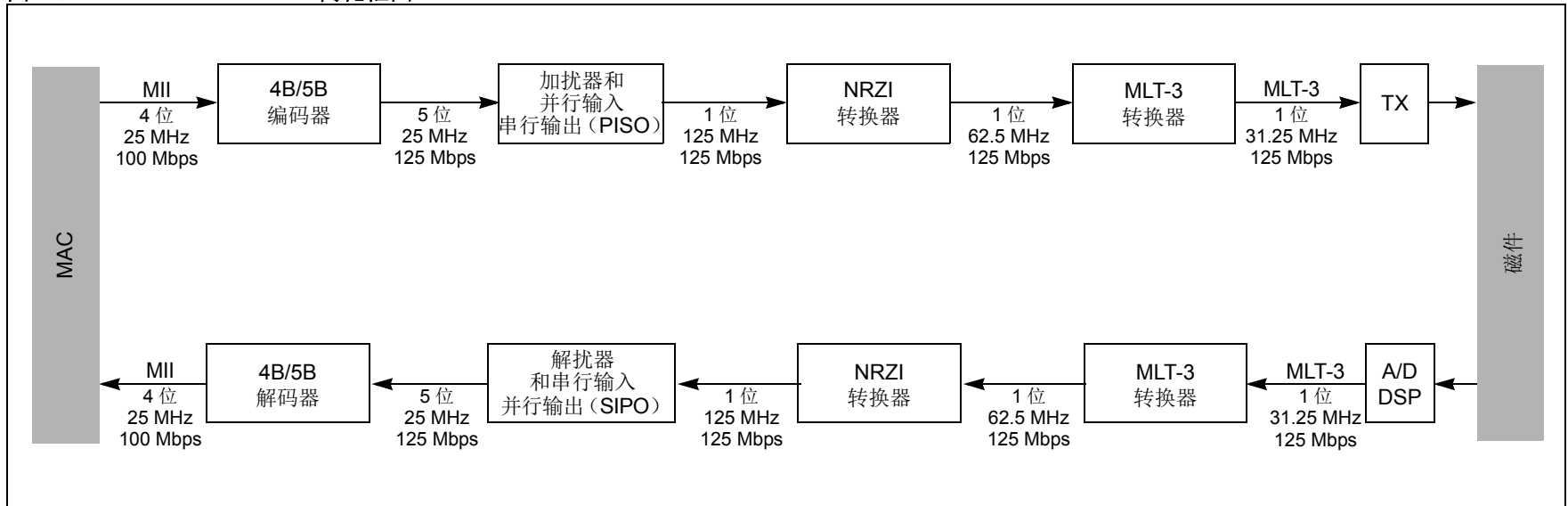
到目前为止，我们已经讨论了10Base-T（使用曼彻斯特编码）和100Base-T（使用NRZI、MLT3和4B/5B编码）的编解码。

使用一次转换代表一个位的曼彻斯特编码时，10 Mbps数据速率就表示介质的带宽需要达到10 MHz。通过在介质上使用差分信号可以提高抗噪性。

随后，如何结合100Base-TX上采用的所有编码方法来产生通过介质传输的最终信号呢？

图14给出了100Base-TX PHY的简化框图，其中每个阶段都有带宽要求。从该图中可以看出，即使流的有效数据速率由于4B/5B编码而增加到125 Mbps，物理介质所需的带宽实际上也仍远小于125 MHz。

图 14: 100Base-TX PHY 简化框图



自动协商

两个节点交流各自的能力（速度、双工和暂停帧支持等），然后为链路两端选择二者都能达到的最高水平，这样的过程就称为自动协商。自动协商在链路初始化时进行，并且向后兼容（即，不会损坏不支持自动协商的节点）。自动协商对于10Base-T和100Base-T是可选的，但对于千兆位以太网则是必需的。

通过使用图15所示的快速链路脉冲（Fast Link Pulse, FLP）来执行自动协商。FLP与正常链路脉冲（NLP）类似，但在NLP之间以17-33个脉冲（称为链路代码字）的突发形式传输。考虑到FLP的最小间隔时间约为62.5 μs并且位时间为100 ns（10 Mbps）和10 ns（100 Mbps），因此应明确一点，以太网节点不会将FLP解释为有效数据。实际上，不支持自动协商的节点会将FLP解释为NLP并忽略。默认情况下，支持自动协商的节点如果未从链路的另一端收到任何FLP，则默认情况下会自动设置为两者能够达到的最低水平（通常为半双工10Base-T）。此外，某些以太网PHY能够区分10 Mbps和100 Mbps模式（基于链路上的物理编码），这是一种称为并行检测的功能。当然，仍然可以手动配置链路的每一端以确定通用能力，但这必须在软件中完成。

可能存在两个节点均支持自动协商但没有通用能力的情况。在这种情况下，不会建立任何链路。

IEEE 802.3并未定义每个节点发送的链路代码字的最大数量，但是支持自动协商的每个节点必须能够传输自动协商基本页。

16位（1个链路代码字）基本页定义了节点的能力，具体如下：

Bit 0-4: 称为选择器位域（S0-S4），该位域定义使用的LAN技术类型。对于IEEE 802.3以太网，该位域设置为10000。

Bit 5-12: 称为技术能力位域（A0-A7），该位域定义节点的能力。

Bit 5-9: 定义链路类型，优先级定义如下（按最高优先级到最低优先级的顺序）：

100Base-TX全双工（bit 3置1）

100Base-T4（bit 4置1）

100Base-TX（bit 2置1）

10Base-T全双工（bit 1置1）

10Base-T（bit 0置1）

Bit 10: 0 = 未使能暂停
1 = 使能暂停

Bit 11: 支持全双工链路的非对称暂停操作

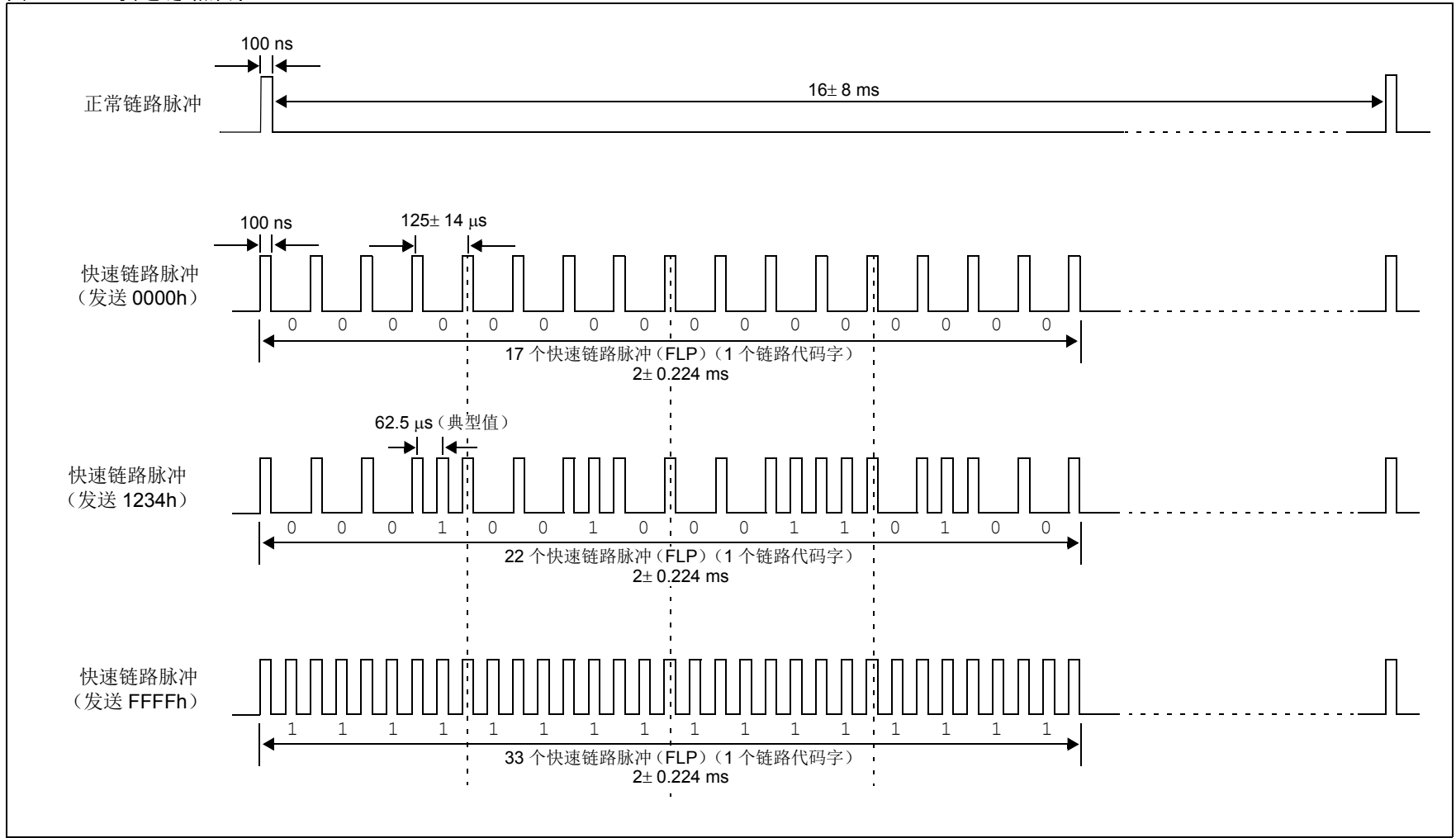
Bit 12: 扩展的下一页位，仅适用于千兆位以太网节点。

Bit 13: 称为远程故障（Remote Fault, RF）指示位，该位指示远程故障。

Bit 14: 称为应答（Ack）位，该强制位用于发出已收到FLP报文的信号。必须连续三次以相同方式接收到FLP报文，才能认为FLP报文正确并作出应答。

Bit 15: 称为下一页（NP）位，该位指示下一页链路代码字是否在基本页之后。下一页字是一项可选功能，用于在自动协商期间在连接节点之间发送额外的信息。

图 15: 快速链路脉冲



自动交叉

在正确配置的以太网连接中，一个节点的TX端口/RX端口连接到另一节点的RX端口/TX端口。

在星形拓扑UTP以太网中，通常是在交换机/集线器/路由器与以太网插孔之间进行交叉连接。因此，大多数UTP以太网线缆的末端连接器之间都有一一对应的引脚。这种类型的线缆通常称为“直通线缆”。

不过，还有另外一种不同类型的线缆，称为“交叉线缆”。这种类型的线缆在内部将线缆一端的TX和RX端口与线缆另一端的RX和TX端口交叉连接。当直接连接为点对点网络时，这种类型的线缆允许两端的以太网设备相互通信。此外，交叉线缆还允许一个交换机/集线器/路由器与另一个交换机/集线器/路由器通信。使用错误的线缆类型不会损坏兼容的以太网节点，但是任何一个节点都将无法通信或检测链路。

为了消除布线不匹配问题并减少用户的挫败感，可以选择在节点中实现称为自动交叉的功能。使用该功能时，支持自动交叉的节点将使其TX/RX引脚自动在TX和RX之间交换，直到建立链路。这样一来，无论为节点使用交叉线缆还是直通线缆都可以达到相同的效果。在连接的一对节点中，有一个实现自动交叉即可。大多数现代交换机、路由器等均已实现自动交叉。

请注意，该功能不同于“自动极性”（节点可以在TX端口或RX端口上自动切换正负信号）。这两个功能用途不同且毫不相关。

自动交叉有时也称为Auto-MDIX，因为交叉（Auto-MDIX中的“X”）发生在节点的MDI层（见[图6](#)）。

参考资料

本应用笔记中参考了以下文档：

- IEEE 802.3 规范
- 相关 IEEE 补充资料（见表4）

表4：最常用的规范补充资料

补充资料	年份	说明
IEEE 802.3a	1985	10Base-2 细缆以太网
IEEE 802.3c	1985	10 Mbps 中继器规范
IEEE 802.3d	1987	光纤中继器间链路
IEEE 802.3i	1990	10Base-T 双绞线
IEEE 802.3j	1993	10Base-F 光纤
IEEE 802.3u	1995	100Base-T 快速以太网和自动协商
IEEE 802.3x	1997	全双工标准
IEEE 802.3z	1998	1000Base-X 千兆位以太网（SX、LX 和 CX）
IEEE 802.3ab	1999	基于双绞线的 1000Base-T 千兆位以太网
IEEE 802.3ac	1998	VLAN 标记的帧大小扩展为 1522 个八位字节
IEEE 802.3ad	2000	并行链路的链路聚合
IEEE 802.3af	2003	以太网供电（Power Over Ethernet, PoE）

AN1120

注:

请注意以下有关 **Microchip** 器件代码保护功能的要点：

- **Microchip** 的产品均达到 **Microchip** 数据手册中所述的技术指标。
- **Microchip** 确信：在正常使用的情况下，**Microchip** 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 **Microchip** 数据手册中规定的操作规范来使用 **Microchip** 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- **Microchip** 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- **Microchip** 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。**Microchip** 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 **Microchip** 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 **Microchip** 产品性能和使用情况的有用信息。**Microchip Technology Inc.** 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 **Microchip Technology Inc.** 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。**Microchip** 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。**Microchip** 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 **Microchip** 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 **Microchip** 免于承担法律责任，并加以赔偿。除非另外声明，在 **Microchip** 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、**Microchip** 徽标、**Adaptec**、**AnyRate**、**AVR**、**AVR** 徽标、**AVR Freaks**、**BesTime**、**BitCloud**、**chipKIT**、**chipKIT** 徽标、**CryptoMemory**、**CryptoRF**、**dsPIC**、**FlashFlex**、**flexPWR**、**HELDO**、**IGLOO**、**JukeBlox**、**KeeLoq**、**Kleer**、**LANCheck**、**LinkMD**、**maXStylus**、**maXTouch**、**MediaLB**、**megaAVR**、**Microsemi**、**Microsemi** 徽标、**MOST**、**MOST** 徽标、**MPLAB**、**OptoLyzer**、**PackeTime**、**PIC**、**picoPower**、**PICSTART**、**PIC32** 徽标、**PolarFire**、**Prochip Designer**、**QTouch**、**SAM-BA**、**SenGenuity**、**SpyNIC**、**SST**、**SST** 徽标、**SuperFlash**、**Symmetricom**、**SyncServer**、**Tachyon**、**TempTrackr**、**TimeSource**、**tinyAVR**、**UNI/O**、**Vectron** 及 **XMEGA** 均为 **Microchip Technology Incorporated** 在美国和其他国家或地区的注册商标。

APT、**ClockWorks**、**The Embedded Control Solutions Company**、**EtherSynch**、**FlashTec**、**Hyper Speed Control**、**HyperLight Load**、**IntelliMOS**、**Liberio**、**motorBench**、**mTouch**、**Powermite 3**、**Precision Edge**、**ProASIC**、**ProASIC Plus**、**ProASIC Plus** 徽标、**Quiet-Wire**、**SmartFusion**、**SyncWorld**、**Temux**、**TimeCesium**、**TimeHub**、**TimePictra**、**TimeProvider**、**Vite**、**WinPath** 和 **ZL** 均为 **Microchip Technology Incorporated** 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、**AKS**、**Analog-for-the-Digital Age**、**Any Capacitor**、**AnyIn**、**AnyOut**、**BlueSky**、**BodyCom**、**CodeGuard**、**CryptoAuthentication**、**CryptoAutomotive**、**CryptoCompanion**、**CryptoController**、**dsPICDEM**、**dsPICDEM.net**、**Dynamic Average Matching**、**DAM**、**ECAN**、**EtherGREEN**、**In-Circuit Serial Programming**、**ICSP**、**INICnet**、**Inter-Chip Connectivity**、**JitterBlocker**、**KleerNet**、**KleerNet** 徽标、**memBrain**、**Mindi**、**MiWi**、**MPASM**、**MPF**、**MPLAB Certified** 徽标、**MPLIB**、**MPLINK**、**MultiTRAK**、**NetDetach**、**Omniscient Code Generation**、**PICDEM**、**PICDEM.net**、**PICkit**、**PICtail**、**PowerSmart**、**PureSilicon**、**QMatrix**、**REAL ICE**、**Ripple Blocker**、**SAM-ICE**、**Serial Quad I/O**、**SMART-I.S.**、**SQI**、**SuperSwitcher**、**SuperSwitcher II**、**Total Endurance**、**TSHARC**、**USBCheck**、**VariSense**、**ViewSpan**、**WiperLock**、**Wireless DNA** 和 **ZENA** 均为 **Microchip Technology Incorporated** 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 **Microchip Technology Incorporated** 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、**Frequency on Demand**、**Silicon Storage Technology** 和 **Symmcom** 均为 **Microchip Technology Inc.** 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 **Microchip Technology Inc.** 的子公司 **Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG** 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2020, **Microchip Technology Incorporated** 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-5937-8

有关 **Microchip** 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。



全球销售及及服务网点

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:
<http://www.microchip.com/support>

网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta

Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 Austin, TX

Tel: 1-512-257-3370

波士顿 Boston

Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago

Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas

Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit

Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX

Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis

Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles

Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC

Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY

Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA

Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto

Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

澳大利亚 **Australia - Sydney**
Tel: 61-2-9868-6733

印度 **India - Bangalore**
Tel: 91-80-3090-4444

印度 **India - New Delhi**
Tel: 91-11-4160-8631

印度 **India - Pune**
Tel: 91-20-4121-0141

日本 **Japan - Osaka**
Tel: 81-6-6152-7160

日本 **Japan - Tokyo**
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 **Korea - Daegu**
Tel: 82-53-744-4301

韩国 **Korea - Seoul**
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚
Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 **Malaysia - Penang**
Tel: 60-4-227-8870

菲律宾 **Philippines - Manila**
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 **Singapore**
Tel: 65-6334-8870

泰国 **Thailand - Bangkok**
Tel: 66-2-694-1351

越南 **Vietnam - Ho Chi Minh**
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

奥地利 **Austria - Wels**
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦
Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 **Finland - Espoo**
Tel: 358-9-4520-820

法国 **France - Paris**
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 **Germany - Garching**
Tel: 49-8931-9700

德国 **Germany - Haan**
Tel: 49-2129-3766400

德国 **Germany - Heilbronn**
Tel: 49-7131-72400

德国 **Germany - Karlsruhe**
Tel: 49-721-625370

德国 **Germany - Munich**
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

德国 **Germany - Rosenheim**
Tel: 49-8031-354-560

以色列 **Israel - Ra'anana**
Tel: 972-9-744-7705

意大利 **Italy - Milan**
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

意大利 **Italy - Padova**
Tel: 39-049-7625286

荷兰 **Netherlands - Drunen**
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

挪威 **Norway - Trondheim**
Tel: 47-7288-4388

波兰 **Poland - Warsaw**
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚
Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

西班牙 **Spain - Madrid**
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

瑞典 **Sweden - Gothenberg**
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 **Sweden - Stockholm**
Tel: 46-8-5090-4654

英国 **UK - Wokingham**
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820